

УДК 539.3

**МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З
ВРАХУВАННЯМ ФАКТОРУ ВОЛОГОСТІ ТА ВІКУ НА ОСНОВІ
ДІАГРАМ СТАНУ «МОМЕНТ-КРИВИНА»**

DOI: 10.33842/2313-125X-2026-29-83-93

Гомон Св.Св., докт. техн. наук,

homonsviatoslav@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9818-1804*Національний університет водного господарства та природокористування (Україна, м. Рівне)*

Чапюк О.С., канд. техн. наук,

ochapiuk1983@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0283-1863

Свиридюк О.Б., аспірант*,

a.b.svyrydiuk@gmail.com, ORCID: 0009-0000-5914-287X

Кратюк О.М., аспірант*,

7leon7@ukr.net, ORCID: 0009-0007-8265-9544

Суворов О.М., аспірант*,

a.suvorov@ukr.net, ORCID: 0009-0009-7077-3600*Луцький національний технічний університет (м. Луцьк, Україна)*

У статті наведено моделювання роботи дерев'яних елементів з врахуванням фактору вологості та віку на основі діаграм стану «момент-кривина». Також розглядалося спрощення нелінійного аналізу прямокутних дерев'яних елементів за роботи на згин на основі залежності «момент-кривина».

Актуальність дослідження пов'язана з необхідністю вдосконалення інженерних методів оцінки міцності та жорсткості дерев'яних елементів і конструкцій з урахуванням реальної механічної поведінки деревини. Метою роботи є визначення характерних параметрів граничного стану дерев'яних елементів з врахуванням фактору вологості та віку, а також розробка спрощених аналітичних функцій, що описують діаграми «момент-кривина» за вище наведених умов експлуатації. Показано, що залежність «кривина-момент» для прямокутних поперечних перерізів можна ефективно апроксимувати спрощеними функціями, придатними для інженерних розрахунків. Встановлено, що для заданої породи деревини, незалежно від розмірів елемента, на діаграмі «момент-кривина» існує характерна точка, що відповідає максимальній здатності до згинального моменту та критичній кривизні. Ця точка визначає граничний стан елемента та може бути використана для оцінки несучої здатності. Запропоновано спрощені функції, що описують кривизну як функцію згинального моменту. Наведено коефіцієнти для різних листяних та

* Науковий керівник - докт. техн. наук, Гомон Св.Св., канд. техн. наук, Чапюк О.С.,

хвойних порід деревини (сосни, модрина, ялини, берези, вільхи, ясена) з урахуванням вмісту вологи та віку матеріалу. Запропоновані коефіцієнти дозволяють будувати практичні діаграми «момент-кривина» для різних умов експлуатації в залежності від породи деревини, вологості, а також віку. Результати можуть бути застосовані при проектуванні та числовому аналізі дерев'яних елементів і конструкцій, підвищуючи їх точність оцінки міцності та зменшуючи складність самого обчислення.

Ключові слова: деревина, згин, діаграма «момент-кривина», дерев'яний елемент, напружено-деформований стан, несуча здатність, жорсткість, моделювання, міцність, вологість.

Постановка проблеми. Деревина – це цінний природний матеріал, який має свої неповторні властивості. Дуже часто використовують в промисловому та цивільному будівництві, в тому числі в якості несучих конструкцій. Найбільш застосованими є згинальні елементи: балки, арки, ферми та інші. Дуже часто працюють за різних умов та режимів експлуатації. Елементи та конструкції з деревини згідно діючих нормативних документів [1, 2] можуть експлуатуватися з різними показниками вологості. Це враховується за допомогою коефіцієнта K_{mod} .

Але з іншої сторони чинні ДБН [1] та Eurocode [2] фактично не враховують роботу дерев'яних елементів та конструкцій з підвищеним вмістом вологи, що в певних випадках обмежує розрахунок і проектування за таких умов експлуатації.

В даній статті буде запропоновано моделювання роботи дерев'яних елементів з врахуванням фактору вологості та віку на основі діаграм стану «момент – кривина».

Аналіз останніх досліджень. Фізико-механічні властивості деревини безпосередньо впливають на розрахунок та проектування елементів та конструкцій на їх основі, в тому числі згинальних [3-9]. Як ми і говорили, можлива зміна вологості безпосередньо впливає на механічні властивості деревини. Зі збільшенням вологості, міцність зменшується, деформівні показники збільшуються [10-19]. Такі характеристики в чинних нормативних документах частково відображається класами міцності та коефіцієнтом K_{mod} , але не в повній мірі.

Розрахунок елементів та конструкцій з деревини проводиться згідно [1, 2], що матеріал працює тільки пружно. Таке припущення не можна використовувати при розрахунках, оскільки при збільшенні вологості пластичні відносні деформації збільшуються, а пружні навпаки зменшуються. Це підтвердили нами проведені експериментальні дослідження [14-16]. Також не враховується вік деревини [20].

Оскільки в розрахунках елементів та конструкцій на основі деревини частково враховуються вище наведені фактори, в тому числі згинальних, то необхідно удосконалювати існуючі методики розрахунку на основі діаграм стану «момент – кривина».

Формулювання цілей статті. Метою роботи є визначення характерних параметрів граничного стану дерев'яних елементів з врахуванням фактору вологості та віку, а також розробка спрощених аналітичних функцій, що описують діаграми «момент – кривина» за вище наведених умов експлуатації.

Основна частина. Для визначення внутрішніх зусиль в поперечному перерізі прямокутної форми згинального елемента використаємо функції внутрішніх зусиль, враховуючи що функція ширини по висоті перерізу буде рівна $f_b(z) = b = const$ ми отримаємо розрахунковий переріз, який зображений на рис 1.

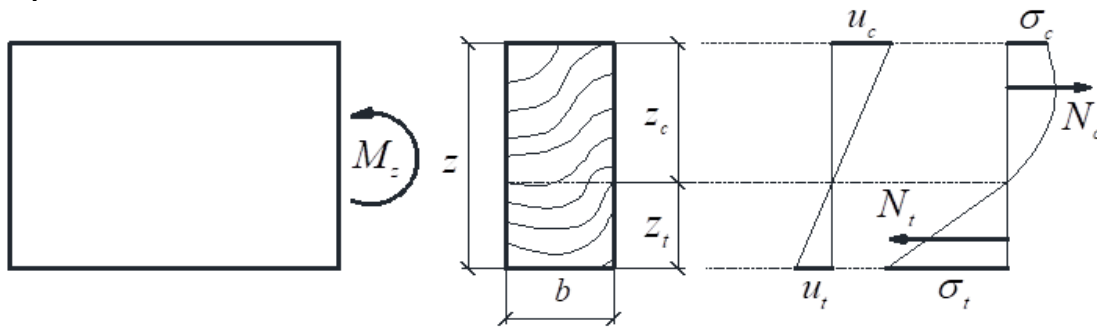


Рис.1. Розміри та внутрішні зусилля в поперечному перерізі згинального елемента прямокутної форми

Внутрішні зусилля з врахуванням форми перерізу та обраних функцій приймуть вигляд (1) та (2)

$$N_{c,d} = b \cdot \frac{z_c}{u_c} \int_0^{u_c} \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} du; \quad (1)$$

$$N_{t,d} = b \cdot \frac{z_t}{u_t} \int_0^{u_t} E u du. \quad (2)$$

Проведемо інтегрування по висоті перерізу від нейтральної лінії до країв стиснутої та розтягнутої зони. Визначимо згинальний момент, що діють в стиснутій і розтягнутій зоні, провівши інтегрування по висоті перерізу від нейтральної лінії до країв зон. Після інтегрування внутрішні зусилля в прямокутному перерізі згинального дерев'яного елемента будуть дорівнювати

$$N_c = b \cdot z_c \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+1} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0}^{i-1}}; \quad (3)$$

$$N_t = b \cdot z_t \cdot \frac{E \cdot u_t}{2}. \quad (4)$$

$$M_c = b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0}^{i-1}}. \quad (5)$$

$$M_t = b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3}. \quad (6)$$

Загальний момент для деревини буде дорівнювати:

$$M_Z = b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3}. \quad (7)$$

Якщо взяти інтеграл від функції моменту ми можемо знати екстремум даної функції:

$$\frac{d(M_Z)}{d(\xi)} = \left(b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \right)' \quad (8)$$

$$\frac{d(M_Z)}{d(\xi)} = \left(b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \right) / d(\xi) \quad (9)$$

де $d(\xi) = \frac{du_c}{z_c} = \frac{du_t}{z_t}$, тоді рівняння прийме вигляд

$$\frac{d(M_Z)}{d(\xi)} = \left(b \cdot z_c^3 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} \right) / du_c + \left(b \cdot z_t^3 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \right) / du_t. \quad (10)$$

Щоб знайти екстремум функції прирівняємо до 0 формулу (10)

$$\left(b \cdot z_c^3 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} \right) / du_c + \left(b \cdot \frac{u_t^3}{u_c^3} z_c^3 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \right) / du_t = 0. \quad (11)$$

Якщо поділити весь вираз на $b \cdot z_c^3$ ми отримаємо

$$\left(\sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} \right) / du_c + \left(\frac{E \cdot u_t^4}{3 \cdot u_c^3} \right) / du_t = 0. \quad (12)$$

Вираз (12) показує, що екстремум функції для залежності момент від кривини не залежить від ширини та товщини перерізу балки. Тобто максимальне значення моменту який може сприйняти переріз буде при постійних значення u_c та u_t . Назвемо ці значення $u_{c,fin}$ та $u_{t,fin}$. Максимальне значення, яке може сприйняти поперечний переріз згинального дерев'яного елемента, прийнято визначати з графіка «момент-кривина». Такий графік будується на основі системи двох рівнянь. З одної сторони рівноваги внутрішніх поздовжніх зусиль та моменту, що може сприйняти переріз. Вигляд графіку «момент-кривина» для прямокутного перерізу має вигляд (рис. 2).

Запишемо систему рівнянь для визначення напруженого стану згинального елемента з врахуванням функцій діаграм деформування матеріалу

$$\begin{cases} b \cdot z_c \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+1} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0}^{i-1}} - b \cdot z_t \cdot \frac{E \cdot u_t}{2} = 0 \\ M_Z = b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \end{cases} \quad (13)$$

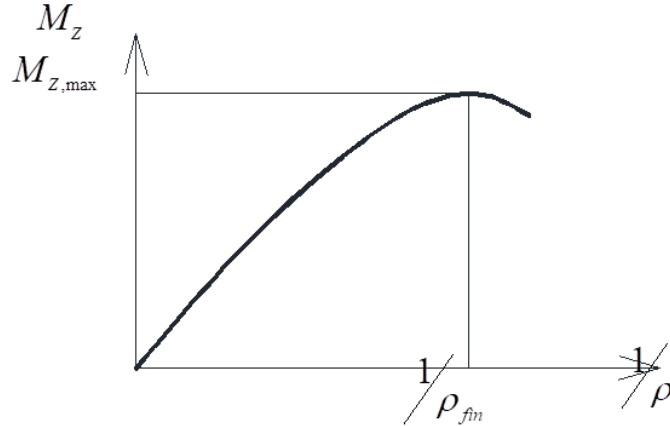


Рис.2. Графік «момент-кривина» для прямокутного перерізу: $\frac{1}{\rho_{fin}}$ - це кривина при якій значення переріз може сприйняти максимальний згинальний момент $M_{Z,max}$.

Розділимо верхню частину на $b \cdot z$, а нижчу частину $b \cdot z^2$ цим самим ми побудуємо геометричних характеристик перерізу дерев'яного елементу. Замінімо співвідношення висоти стиснутої та розтягнутої зон до висоти перерізу. Отримаємо систему рівнянь для визначення напружено-деформованого стану поперечного перерізу прямокутної форми дерев'яного згинального елементу

$$\begin{cases} \frac{u_c}{u_c + u_t} \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+1} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0}^{i-1}} - \frac{u_t}{u_c + u_t} \cdot \frac{E \cdot u_t}{2} = 0 \\ \frac{M_Z}{bz^2} = \left(\frac{u_c}{u_c + u_t} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + \left(\frac{u_t}{u_c + u_t} \right)^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \end{cases} \quad (14)$$

Основною характеристикою згинального елементу є графік функції, який буде єдиний для прямокутного перерізу з однаковими характеристиками матеріалу

$$\frac{M_Z}{bz^2} = f(u_c, u_t). \quad (15)$$

Побудуємо графік даної функції для деревини з функцією діаграми деревини на стиск

$$\sigma_c = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,fin}^{i-1}}, \quad (16)$$

де $w_1 = 15378$; $w_2 = -1467$; $w_3 = -6673$; $w_4 = 2138$; $u_{c,fin} = 0,0061$ - коефіцієнти отримані шляхом випробування деревини за жорстким режимом.

Побудуємо графік залежності «момент-кривина» (рис. 3).

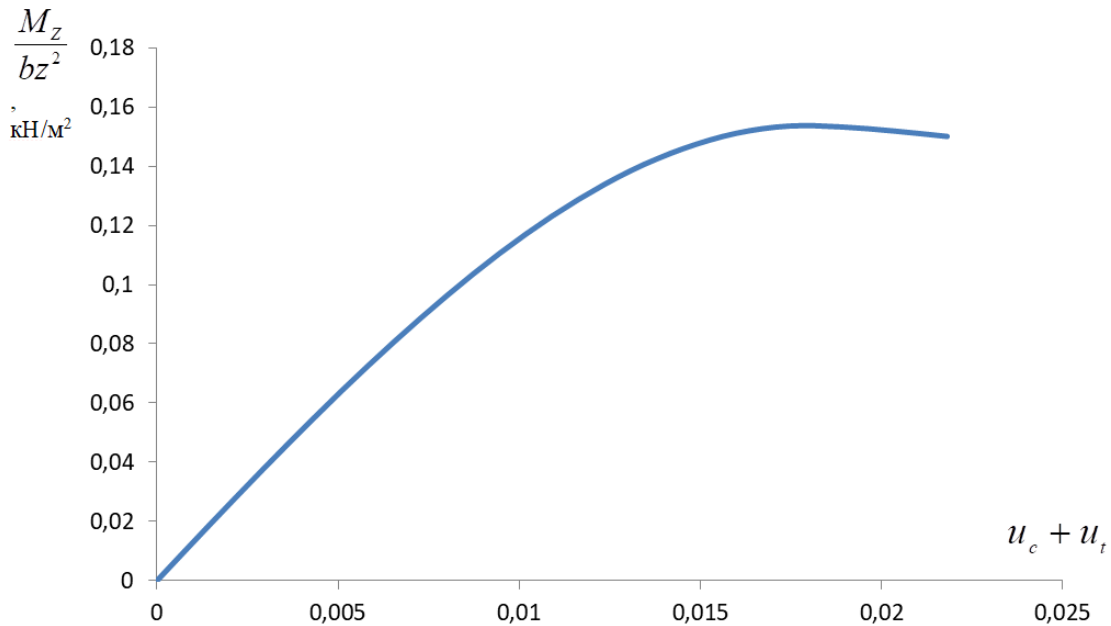


Рис.3. Графік «момент-кривина» для прямокутного перерізу

Апроксимація функції залежності дозволить спростити розрахунки дерев'яних згинальних елементів. Використаємо многочлен Лагранжа для апроксимації цієї функції. Ми отримаємо функцію залежності кривини від моменту.

$$\xi = \frac{1}{z} G_1 (M_z / bz^2)^2 + G_2 (M_z / bz^2), \quad (17)$$

де ξ - кривина, яка виникає при дії момента M_z в балці;

z, b - геометричні характеристик перерізу балки;

G_1, G_2 - коефіцієнти залежності (визначені для різних порід деревини та наведені в табл. 1 та табл. 2).

Таблиця 1

Коефіцієнти G_1, G_2 для побудови графіку «момент-кривина» для хвойних порід

Коефіцієнти	Сосна		Модрина		Ялина	
	G_1	G_2	G_1	G_2	G_1	G_2
Вологість 12%	0,4314	0,0709	0,2730	0,0731	0,4051	0,0708
Вологість 21%	1,1040	0,0789	1,0860	0,0518	1,3017	0,0540
Вологість 30%	3,1314	0,0446	2,7544	0,0255	3,5393	0,0164
Вік 40 років	0,4826	0,0706	0,3302	0,0743	0,2907	0,0840
Вік 20 років	0,6424	0,0766	0,4104	0,0831	0,4610	0,0899

Таблиця 2

**Коефіцієнти G_1, G_2 для побудови графіку «момент-кривина»
для листяних порід**

Коефіцієнти	Береза		Вільха		Ясен	
	G_1	G_2	G_1	G_2	G_1	G_2
Вологість 12%	0,4950	0,0694	0,5582	0,0699	0,6380	0,0256
Вологість 21%	1,8866	0,0312	2,0729	0,0635	1,0631	0,0363
Вологість 30%	3,7642	0,0135	4,3377	0,0241	1,6639	0,0288
Вік 40 років	0,5417	0,0706	0,5952	0,0752	0,5152	0,0413
Вік 20 років	0,8082	0,0770	2,1083	0,0357	0,7592	0,0409

Обернена функція від (17) є функція залежності моменту, який діє на переріз від кривини. Її можна записати у вигляді формули (18)

$$M_Z = bz^2 \left(g_1(\xi \cdot z)^2 + g_2(\xi \cdot z) \right), \quad (18)$$

де g_1, g_2 – коефіцієнти залежності наведені в табл. 3 та табл.4 в залежності від породи деревини.

Таблиця 3

**Коефіцієнти g_1, g_2 для побудови графіку «момент-кривина» для
хвойних порід**

Коефіцієнти	Сосна		Модрина		Ялина	
	g_1	g_2	g_1	g_2	g_1	g_2
Вологість 12%	-260,70	11,805	-189,40	11,947	-275,08	12,075
Вологість 21%	-230,74	8,994	-222,35	9,925	-292,01	10,044
Вологість 30%	-242,10	7,527	-199,37	7,725	-272,19	7,958
Вік 40 років	-268,29	11,630	-198,06	11,583	-185,20	11,010
Вік 20 років	-285,97	10,767	-199,48	10,592	-217,67	10,128

Таблиця 4

**Коефіцієнти g_1, g_2 для побудови графіку «момент-кривина» для листяних
порід**

Коефіцієнти	Береза		Вільха		Ясен	
	g_1	g_2	g_1	g_2	g_1	g_2
Вологість 12%	-239,43	11,370	-275,13	11,352	-332,45	14,601
Вологість 21%	-256,18	9,279	-214,70	7,804	-280,56	11,237
Вологість 30%	-220,70	7,327	-185,29	6,452	-245,80	9,654
Вік 40 років	-243,73	11,128	-267,41	10,831	-329,16	14,174
Вік 20 років	-250,37	9,955	-461,02	10,447	-356,76	13,077

Висновки. 1. Наведено моделювання роботи дерев'яних елементів з врахуванням фактору вологості та віку на основі діаграм стану «момент – кривина».

2. Для розрахунків дерев'яних елементів прямокутної форми можливе спрощення діаграм залежності кривини від згинального моменту, які є

основним показником міцності поперечного перерізу.

3. Для деревини незалежно від розмірів буде існувати лише одна точка на графіку «момент – кривина», яка буде вказувати на максимальні значення зусилля, які може сприйняти переріз, а також критичну кривину.

4. Отримано спрощені функції, що описують діаграми залежності кривини від згинального моменту. У роботі наведено коефіцієнти для різних порід деревини (сосна, модрина, ялиця, береза, вільха, ясен) з урахуванням їх вологості та віку, за допомогою яких можна будувати діаграми «момент – кривина».

Література

1. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. К.: Мінрегіон України, 2017. 111 с.
2. Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings, 124 p.
3. Zhao K., Wei Y., Chen S., Hang C., Zhao K., 2020. Experimental investigation of the long-term behavior of reconstituted bamboo beams with various loading levels. *Journal of Building Engineering* 36, 102107. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102107/>
4. Zakic B.D., 1974. Inelastic bending of wood beams. *Journal of the Structural Division* 99(10), 2079-2092. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0003621>
5. Thelanderson S., Larsen H.J., 2003. Timber Engineering. John Wiley & Sons, LTD, 457 p.
6. Landis E.N., Vasic S., Davids W.G., Parrod P., 2002. Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood. *Experimental Mechanics* 42, 389–394. <https://doi.org/10.1007/BF02412143>
7. Mykhailovskyi M., Komar O., Komar M., 2022. Engineering method of calculating laminated timber elements reinforced with composite tapes. *Strength of Materials and Theory of Structures* 109, 239-262. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.239-262>
8. Gomon S., Homon S., Gomon P., Karavan V., Pavluk A., Karavan B., Puhach Yu., Petrenko O., 2026. Analysis of the existing method for calculating the bending of wooden elements according to established design standards. *AIP Conference Proceedings* 3364, 020014. <https://doi.org/10.1063/5.0305605>
9. Gomon P., Gomon S., Homon S., Karavan B., Drobyshynets S., Sunak P., Chapiuk O., Chornomaz N., 2026. Determining deflection from tangential stresses, considering the nonlinearity of wooden beam materials. *AIP Conference Proceedings* 3364, 020012. <https://doi.org/10.1063/5.0305606>
10. Cragg S. M., 1996. Timber in the marine environment. *Timber Trades Journal* 376, 26-28.
11. Fojtik R., 2019. Moisture content analysis of wooden bridges. *Wood research* 64(3), 529-536. DOI:[10.15376/biores.11.2.3904-3913](https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3904-3913)
12. Crossman M., Simm J., Crossman M., 2004. Manual on the use of timber in coastal and river engineering. London: Thomas Telford.

13. Báder M., Németh R., 2019. Moisture-dependent mechanical properties of longitudinally compressed wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 77, 1009-1019. DOI:[10.1515/HF.2010.061](https://doi.org/10.1515/HF.2010.061)
14. Roshchuk M., Homon S., Pavluk A., Gomon S., Drobyshynets S., Romaniuk M., Smal M., Dziubynska O., 2024. Effect of long-term moisture on the mechanical properties of wood: an experimental study. *Procedia Structural Integrity* 59, 718-723. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.102>
15. Homon S., Litnitskyi S., Gomon P., Kulakovskiy L., Kutsyna I., 2023. Methods for determining the critical deformations of wood at various moisture. *Scientific Horizons* 26(1), 73-86. [https://doi.org/10.48077/scihor.26\(1\).2023.73-86](https://doi.org/10.48077/scihor.26(1).2023.73-86)
16. Janiak T., Homon S., Karavan V., Gomon P., Gomon S.S., Kulakovskiy L., Famulyak Y., 2023. Mechanical properties of solid deciduous species wood at different moisture content. *AIP Conference Proceedings* 2949, 020009. <https://doi.org/10.1063/5.0165652>
17. Vasic S., Stanzl-Tschegg S., 2007. Experimental and numerical investigation of wood fracture mechanisms at different humidity levels. *Holzforschung* 61, 367-374. DOI:[10.1515/HF.2007.056](https://doi.org/10.1515/HF.2007.056)
18. Evans P. D., Banks W. B., 1988. Degradation of wood surfaces by water changes in mechanical properties of thin wood strips. *Holz als Roh-und Werkstoff* 46(11), 427-435. <https://doi.org/10.1007/BF02608208>
19. Wang J., Cao X., Liu H., 2021. A review of the long-term effects of humidity on the mechanical properties of wood and wood-based products. *Eur. J. Wood Prod.* 79, 245–259. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01623-9>
20. Homon S., Gomon P., Gomon S., Litnitskyi S., Boyarska I., Chapiuk O., Chornomaz N., 2024. Study of the mechanical properties of coniferous wood of different ages at standard humidity. *Procedia Structural Integrity* 59, 545-550. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.077>

MODELING THE WORK OF WOODEN ELEMENTS TAKING INTO ACCOUNT THE MOISTURE AND AGE FACTOR BASED ON STATE DIAGRAMS «MOMENT-CURVE»

Sviatoslav Homon, Oleksandr Chapiuk, Oleksandr Svyrydiuk, Oleh Kratiuk, Oleksandr Suvorov

The article presents the modeling of the operation of wooden elements taking into account the moisture factor and age based on the “moment-curvature” state diagrams. The simplification of the nonlinear analysis of rectangular wooden elements under bending loads based on the “moment-curvature” dependence was also considered.

The relevance of the study is associated with the need to improve engineering methods for assessing the strength and stiffness of wooden elements and structures, taking into account the real mechanical behavior of wood. The aim of the work is to determine the characteristic parameters of the limit state of wooden elements taking into account the moisture factor and age, as well as to develop simplified analytical functions that describe the “moment-curvature” diagrams under the above operating conditions. It is shown that the “curvature-

moment” dependence for rectangular cross-sections can be effectively approximated by simplified functions suitable for engineering calculations. It is established that for a given wood species, regardless of the size of the element, there is a characteristic point on the moment-curvature diagram that corresponds to the maximum bending moment capacity and critical curvature. This point determines the limit state of the element and can be used to assess the bearing capacity. Simplified functions are proposed that describe the curvature as a function of the bending moment. Coefficients are given for various deciduous and coniferous wood species (pine, larch, spruce, birch, alder, ash) taking into account the moisture content and age of the material. The proposed coefficients allow constructing practical moment-curvature diagrams for various operating conditions depending on the wood species, humidity, and age. The results can be used in the design and numerical analysis of wooden elements and structures, increasing their accuracy in assessing strength and reducing the complexity of the calculation itself.

Keywords: wood, bending, moment-curvature diagram, wooden element, stress-strain state, load-bearing capacity, stiffness, modeling, strength, moisture.

References

1. DBN V.2.6-161:2017. (2017). Structures of buildings and сооруже. Timber structures. Basic provisions. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 111 p. [In Ukrainian].
2. Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings, 124 p. [In English].
3. Zhao, K., Wei, Y., Chen, S., Hang, C., & Zhao, K. (2020). Experimental investigation of the long-term behavior of reconstituted bamboo beams with various loading levels. *Journal of Building Engineering*, 36, 102107. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102107> [In English].
4. Zakic, B. D. (1974). Inelastic bending of wood beams. *Journal of the Structural Division*, 99(10), 2079–2092. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0003621> [In English].
5. Thelandersson, S., & Larsen, H. J. (2003). *Timber Engineering*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 457 p. [In English].
6. Landis, E. N., Vasic, S., Davids, W. G., & Parrod, P. (2002). Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood. *Experimental Mechanics*, 42, 389–394. <https://doi.org/10.1007/BF02412143> [In English].
7. Mykhailovskyi, M., Komar, O., & Komar, M. (2022). Engineering method of calculating laminated timber elements reinforced with composite tapes. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 109, 239–262. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.239-262> [In English].
8. Gomon, S., Homon, S., Gomon, P., Karavan, V., Pavluk, A., Karavan, B., Puhach, Yu., & Petrenko, O. (2026). Analysis of the existing method for calculating the bending of wooden elements according to established design standards. *AIP Conference Proceedings*, 3364, 020014. <https://doi.org/10.1063/5.0305605> [In English].

9. Gomon, P., Gomon, S., Homon, S., Karavan, B., Drobyshynets, S., Sunak, P., Chapiuk, O., & Chornomaz, N. (2026). Determining deflection from tangential stresses, considering the nonlinearity of wooden beam materials. *AIP Conference Proceedings*, 3364, 020012. <https://doi.org/10.1063/5.0305606> [In English].
10. Cragg, S. M. (1996). Timber in the marine environment. *Timber Trades Journal*, 376, 26–28. [In English].
11. Fojtik, R. (2019). Moisture content analysis of wooden bridges. *Wood Research*, 64(3), 529–536. [In English].
12. Crossman, M., Simm, J., & Crossman, M. (2004). *Manual on the use of timber in coastal and river engineering*. London: Thomas Telford. [In English].
13. Báder, M., & Németh, R. (2019). Moisture dependent mechanical properties of longitudinally compressed wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77, 1009–1019. [In English].
14. Roshchuk, M., Homon, S., Pavluk, A., Gomon, S., Drobyshynets, S., Romaniuk, M., Smal, M., & Dziubynska, O. (2024). Effect of long-term moisture on the mechanical properties of wood: an experimental study. *Procedia Structural Integrity*, 59, 718–723. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.102> [In English].
15. Homon, S., Litnitskyi, S., Gomon, P., Kulakovskiy, L., & Kutsyna, I. (2023). Methods for determining the critical deformations of wood at various moisture. *Scientific Horizons*, 26(1), 73–86. [https://doi.org/10.48077/scihor.26\(1\).2023.73-86](https://doi.org/10.48077/scihor.26(1).2023.73-86) [In English].
16. Janiak, T., Homon, S., Karavan, V., Gomon, P., Gomon, S. S., Kulakovskiy, L., & Famulyak, Y. (2023). Mechanical properties of solid deciduous species wood at different moisture content. *AIP Conference Proceedings*, 2949, 020009. <https://doi.org/10.1063/5.0165652> [In English].
17. Vasic, S., & Stanzl-Tschegg, S. (2007). Experimental and numerical investigation of wood fracture mechanisms at different humidity levels. *Holzforschung*, 61, 367–374. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.056> [In English].
18. Evans, P. D., & Banks, W. B. (1988). Degradation of wood surfaces by water: changes in mechanical properties of thin wood strips. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 46(11), 427–435. <https://doi.org/10.1007/BF02608208> [In English].
19. Wang, J., Cao, X., & Liu, H. (2021). A review of the long-term effects of humidity on the mechanical properties of wood and wood-based products. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 245–259. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01623-9> [In English].
20. Homon, S., Gomon, P., Gomon, S., Litnitskyi, S., Boyarska, I., Chapiuk, O., & Chornomaz, N. (2024). Study of the mechanical properties of coniferous wood of different ages at standard humidity. *Procedia Structural Integrity*, 59, 545–550. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.077> [In English].